



## REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement les membres du comité de pilotage listés ci-dessous :

| <b>NOMS</b>              | <b>INSTITUTS</b>           | <b>THEMES</b>                            |
|--------------------------|----------------------------|--|
| <b>Antonio Bispo</b>     | ADEME                      | Sol + animation transversale             |
| <b>Vincent Colomb</b>    |                            | ACV + animation transversale             |
| <b>Manuel Martin</b>     | INRA Infosol Orléans       | Sol + animation transversale             |
| <b>Pascal Carrere</b>    | UREP Clermont-Ferrand      | Sol, Prairies                            |
| <b>Katja Klumpp</b>      |                            |  |
| <b>Samy Ait-Amar</b>     | ACTA                       | ACV, inventaire                          |
| <b>Raia Massad</b>       | INRA ECOSYS                | Modélisation + animation transversale    |
| <b>Sandra Eady</b>       | CSIRO                      | ACV, Sol                                 |
| <b>Etienne Mathias</b>   | CITEPA                     | LULUC, inventaire                        |
| <b>Colas Robert</b>      |                            |  |
| <b>Claire Cornillier</b> | FCBA                       | Forêt + animation transversale           |
| <b>Martial Bernoux</b>   | IRD                        | LULUC, inventaire                        |
| <b>Bruno Mary</b>        | INRA Laon                  | Modèle de culture, Carbone, Sol          |
| <b>Sophie Penavayre</b>  | IFV                        | Cultures pérennes, ACV                   |
| <b>Hayo Van der Werf</b> | INRA Rennes                | ACV, Sol                                 |
| <b>Eric Ceschia</b>      | CESBIO (CNES/CNRS/UPS/IRD) | Modèle de culture, télédétection, Albedo |

## CITATION DE CE RAPPORT

**ADEME. Cécile Bessou, Anthony Benoist, Aurélie Tailleur, Caroline Godard, Armelle Gac, Joachim Boissy, 2018, Projet SOCLE, soil organic carbon changes in LCA, which evaluations to improve environmental assessments? Rapport de synthèse 19p.**

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

## Contenu

|   |    |
|---|----|
| 1. Présentation générale du projet .....  | 4  |
| 1.1. Contexte .....   | 4  |
| 1.2. Objectifs du projet.....   | 4  |
| 1.3. Organisation des tâches et partenariat.....                                | 5  |
| 1.4. Animation scientifique .....   | 5  |
| 2. Principaux résultats scientifiques.....                                      | 6  |
| 2.1. Synthèse de la revue bibliographique sur les méthodes .....                | 6  |
| 2.1.1. Contenu du rapport bibliographique .....                                 | 6  |
| 2.1.2. Le cadre conceptuel de prise en compte de l'usage des sols en ACV .....  | 6  |
| 2.1.3. Revue critique des méthodes disponibles.....                             | 8  |
| 2.1.4. Sélection des méthodes et des tests à réaliser sur les cas d'étude ..... | 9  |
| 2.2. Résultats des cas d'étude .....  | 10 |
| 2.2.1. Présentation des cas d'étude .....                                       | 10 |
| 2.2.2. Résultats des cas d'étude .....  | 10 |
| 3. Conclusions et recommandations .....   | 14 |
| 4. Références.....  | 18 |

## Liste des figures et tableaux

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 1 : ORGANISATION DES TACHES ET COORDINATION DU PROJET SOCLE.....  | 5  |
| FIGURE 2: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CADRE CONCEPTUEL DE PRISE EN COMPTE DE L'USAGE DES SOLS EN ACV, POUR UNE TRANSFORMATION REVERSIBLE (ADAPTEE DE KOELLNER ET AL. 2013A).....   | 6  |
| FIGURE 3 : CARTOGRAPHIE DES METHODES RELEVANT DE L'INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE ( <i>LCI</i> , A GAUCHE) OU DE L'EVALUATION DES IMPACTS DE CYCLE DE VIE ( <i>LCIA</i> , A DROITE), ET TRAITANT DES USAGES ET CHANGEMENTS D'USAGES ( <i>LULUC</i> , EN HAUT A GAUCHE), DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ( <i>GHG</i> , EN BAS A GAUCHE), DE LA QUALITE DU SOL ( <i>SOIL QUALITY</i> , EN HAUT A GAUCHE) OU DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ( <i>CLIMATE CHANGE</i> , EN BAS A DROITE) ..... | 8  |
| FIGURE 4 : RESULTATS DES CAS D'ETUDE POUR LES SCENARIOS DE CHANGEMENTS D'USAGES DES SOLS, POUR LES METHODES ILCD / IPCC ET MÜLLER-WENK AND BRANDÃO (2010) .....  | 11 |
| FIGURE 5 : RESULTATS DES CAS D'ETUDE POUR LES SCENARIOS DE CHANGEMENTS DE PRATIQUES, POUR LES METHODES ILCD / IPCC ET MÜLLER-WENK AND BRANDÃO (2010) .....   | 11 |
| FIGURE 6 : SENSIBILITE DES RESULTATS DES CAS D'ETUDE AUX VALEURS DE STOCKS DE CARBONE, CAS DE L'IMPACT DE TRANSFORMATION SELON LA METHODE ILCD / IPCC (REFERENCE = VALEURS PAR DEFAULT IPCC) .....   | 12 |
| FIGURE 7 : SENSIBILITE DES RESULTATS DES CAS D'ETUDE AU MODE DE REPARTITION TEMPORELLE DES IMPACTS DE TRANSFORMATION, CAS DE L'IMPACT DE TRANSFORMATION SELON LA METHODE ILCD/IPCC (REFERENCE = REPARTITION LINEAIRE UNIFORME SUR 20 ANS) .....  | 13 |
| <br>TABLEAU 1 : SYNTHESE DES PRINCIPALES RECOMMANDATIONS EXISTANTES POUR LA DEFINITION DE L'USAGE DE REFERENCE POUR LA CARACTERISATION DES IMPACTS ASSOCIES A L'USAGE DES SOLS.....  | 7  |
| TABLEAU 2 : AVANTAGES COMPARES DES METHODES IPCC / ILCD ET MÜLLER-WENK AND BRANDÃO (2010).....   | 15 |

# 1. Présentation générale du projet

## 1.1. Contexte

L'agriculture et les changements d'usage des sols représentent globalement environ 30% des émissions de gaz à effet de serre ou GES (Baumert et al., 2005 ; Smith et al., 2007). Usages et changements d'usages sont intrinsèquement liés du fait du socle commun qu'ils affectent, le sol. Plus de 57% des émissions de carbone dues à l'agriculture et aux changements d'usage des sols sont issues du déstockage de carbone du sol (Lal, 2004).

D'autre part, le carbone en lien avec la matière organique du sol joue un rôle essentiel notamment dans le maintien de la fertilité et de la résistance à l'érosion du sol ou dans le devenir des polluants dans l'environnement (Arrouays et al., 2002 ; Lal, 2004 ; Germon et al. *In* INRA 2009). La prise en compte du devenir du carbone du sol en fonction d'une activité agricole nécessite donc une approche holistique, l'analyse de cycle de vie (ACV).

Malgré de récents développements, l'application de l'ACV au secteur agricole suscite toujours des questions scientifiques et méthodologiques (Cowell and Clift, 1997 ; Reap et al., 2008), particulièrement sur les impacts liés à l'usage et au changement d'usage des sols (Lindeijer 2000 ; Milà i Canals et al., 2007 ; Kløverpris et al., 2008 ; Koellner et al., 2013). Si des cadres méthodologiques ou réglementaires existent (IPCC<sup>1</sup>, ILCD<sup>2</sup>, PAS2050<sup>3</sup>, MDP<sup>4</sup>, RED<sup>5</sup> etc.), ils ne s'appuient pas tous sur un consensus scientifique unique et ne sont pas immédiatement applicables pour améliorer les ACV agricoles. Ce manque de consensus et de prise en compte holistique de l'usage des sols dans l'ACV contrastent avec les enjeux majeurs liés au rôle potentiel du carbone du sol dans le changement climatique.

## 1.2. Objectifs du projet

A la lumière du contexte, il apparaît que :

- i. la prise en compte du carbone du sol et des impacts de l'usage et du changement d'usage sur ce carbone est primordiale ;
- ii. des cadres méthodologiques et des données sont disponibles ;
- iii. ces méthodes ne sont pas encore harmonisées et valorisées pour une intégration opérationnelle et une caractérisation des impacts dans les ACV agricoles.

Le projet SOCLE avait pour objectif de pallier ce manque en faisant coïncider les informations issues des différentes approches et méthodes afin d'intégrer le carbone du sol et l'influence des usages et changements d'usages des sols dans l'ACV des produits agricoles. Cette intégration doit être cohérente (en accord avec le cadre ACV et en valorisant les résultats de recherche qui sont aboutis et consensuels) et complète (en étant attentif aux effets antagonistes ou en cascade lorsque le rôle du carbone du sol est considéré dans l'impact changement climatique, qualité du sol etc.).

Les objectifs séquentiels de SOCLE sont :

1. Dresser un état des lieux et une étude comparative des méthodologies existantes parmi les références bibliographiques et lignes directrices afin de mettre en évidence les différences en termes d'hypothèses, de mise en œuvre, de domaine de validité et de portée des résultats ;
2. Identifier les enjeux méthodologiques et scientifiques liés aux objectifs d'application des diverses méthodes ;
3. Tester et comparer différentes options méthodologiques à intégrer dans l'ACV et évaluer leurs influences quant aux résultats pour différentes filières ;
4. Faire des recommandations sur les meilleures options méthodologiques.

---

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (GIEC en français)

<sup>2</sup> International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2011. 159p

<sup>3</sup> PAS2050 by BSI (2011) specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services by The British Standards Institution. 45 p

<sup>4</sup> Mécanismes de Développement Propre

<sup>5</sup> Renewable Energy Directive of the European Commission (2009)

### 1.3. Organisation des tâches et partenariat

Le projet SOCLE comporte 3 tâches (Figure 1) permettant de structurer les activités pour atteindre les objectifs séquentiels susmentionnés en optimisant les synergies et les itérations entre tâches et partenaires. Ces activités sont réalisées en collaboration par 4 partenaires : Cirad, Arvalis-Institut du végétal, Institut de l'élevage, Agrotransfert-Ressources et territoires. Ces 4 partenaires ont une expérience reconnue dans la communauté ACV agricole française et été notamment impliqués dans le projet ADEME Agribalyse qui a permis d'harmoniser des ICV et ACV agricoles françaises.

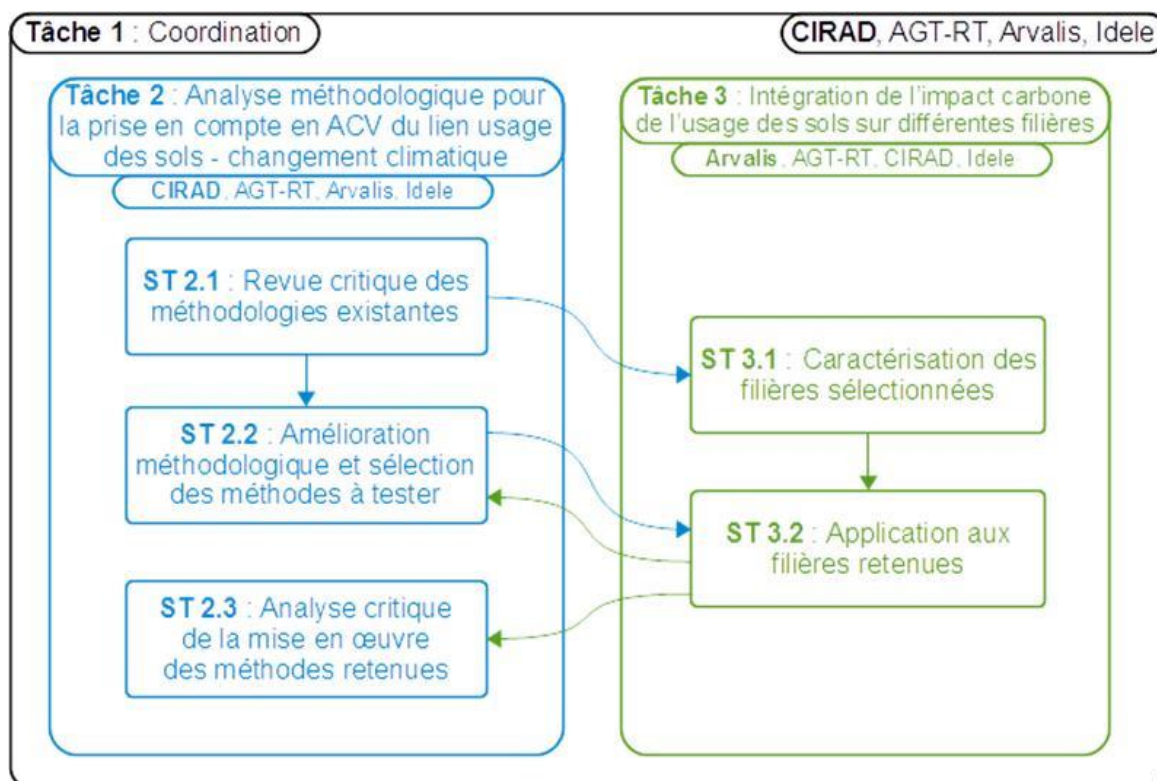


Figure 1 : Organisation des tâches et coordination du projet SOCLE

### 1.4. Animation scientifique

Dans le cadre de SOCLE, nous avons également affiché une volonté de contribuer à porter au sein de la communauté les enjeux de recherche et les besoins de développement liés à la prise en compte du carbone des sols en ACV. À ce titre, la coordination SOCLE s'est mobilisée autour de l'initiative de Sandra Eady du CSIRO pour contribuer à l'organisation d'une consultation internationale sur la prise en compte de la qualité des sols en ACV. Dans ce cadre 2 workshops internationaux ont été co-organisés et animés en marge de la conférence internationale ACV LCA-Food en France (2015) et en Irlande (2016). Ces initiatives ont été prolongées par la contribution de la coordination SOCLE dans le groupe de travail sur la taskforce UNEP-SETAC sur les services écosystémiques, groupe actuellement toujours actif. Enfin, la coordination SOCLE a organisé et présidé une session dédiée à la mise en œuvre du cadre conceptuel « land use » en ACV à l'occasion du 22<sup>ème</sup> SETAC Europe LCA Case Study Symposium, à Montpellier en 2016.

## 2. Principaux résultats scientifiques

### 2.1. Synthèse de la revue bibliographique sur les méthodes

#### 2.1.1. Contenu du rapport bibliographique

Le rapport de revue bibliographique présente l'état des lieux et l'analyse critique des méthodologies existantes (objectif 1) et est organisé comme suit :

- Une introduction approfondie sur les principaux éléments de contexte, relatifs à la prise en compte du lien usage des sols – changement climatique en ACV, incluant notamment :
  - Une description du cadre conceptuel de prise en compte de l'usage des sols en ACV ;
  - Une synthèse des principales critiques ou limitations de ce cadre conceptuel;
  - Un éclairage plus large sur la prise en compte de la qualité des sols en ACV, dont la teneur en carbone des sols est une des composantes (non présenté dans le présent rapport); et
- Une revue critique des méthodes disponibles actuellement pour la prise en compte du lien entre stock de carbone des sols et changement climatique. Cette revue est également élargie aux méthodes proches sur le plan conceptuel, considérant soit les stocks de carbone des sols mais vis-à-vis d'autres enjeux environnementaux, relatifs à la qualité des sols, soit la question du cycle du carbone et de son effet sur le changement climatique, mais de manière non spécifique aux usages et changements d'usages des sols et au stockage de carbone des sols.

#### 2.1.2. Le cadre conceptuel de prise en compte de l'usage des sols en ACV

À partir de la fin des années 1990, un nombre croissant de travaux de recherche furent publiés sur la prise en compte de l'usage des sols en ACV. Mais ce n'est qu'en 2007, suite à une recherche de consensus réalisée par des groupes de travail successifs de l'UNEP-SETAC que le cadre conceptuel est formalisé puis mis à jour en 2013 (Milà i Canals et al. 2007a; Koellner et al. 2013). Ce cadre conceptuel comprend 2 impacts complémentaires pour caractériser l'influence d'un usage des sols sur un état de qualité du sol :

- L'impact de transformation (volume en rouge sur la Figure 2), qui désigne l'impact environnemental résultant d'une modification réelle de qualité des sols due à un changement d'usages ou de pratiques, d'un usage dit précédent à un usage dit étudié.
- L'impact d'occupation (volume en vert sur la Figure 2), qui désigne quant à lui l'impact environnemental associé au maintien, du fait de l'usage étudié, de la qualité du sol à un niveau différent de celui de la référence. Cet impact n'est pas observable directement, et vise à prendre en compte le fait qu'une occupation des sols empêche et retarde le potentiel retour de cet usage à un état de référence. Le sens exact de cet impact peut alors varier selon la définition de cet état de référence, qui peut elle-même varier selon les objectifs de l'étude.

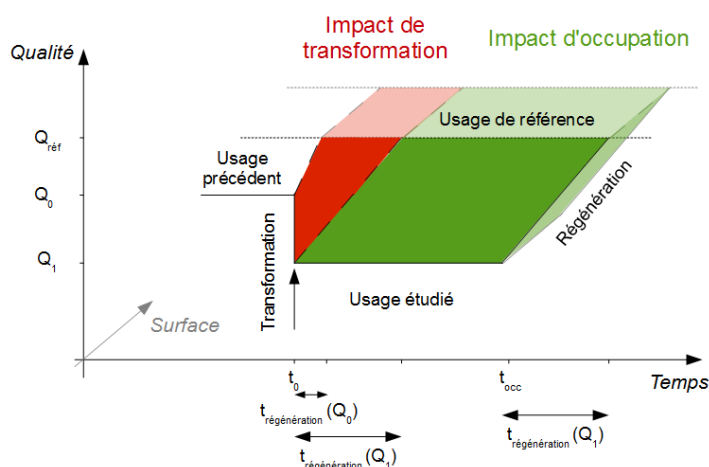


Figure 2: Représentation schématique du cadre conceptuel de prise en compte de l'usage des sols en ACV, pour une transformation réversible (adaptée de Koellner et al. 2013a)



À l'heure actuelle, les principes généraux de ce cadre ne sont pas fondamentalement remis en cause dans la littérature, malgré des hypothèses simplificatrices parfois fortes, telles que le fait de considérer les transformations instantanées ou la qualité d'un usage constante en l'absence de transformation. Le principal élément faisant débat au sein de la communauté scientifique et parmi les praticiens ACV concerne la définition de l'état de référence.

De façon générale, les recommandations portant sur la définition de l'état de référence, au sein ou en dehors des groupes de travail de l'UNEP-SETAC, concordent sur le fait que ce choix doit dépendre des objectifs et du champ de l'étude. Toutefois, en pratique, les recommandations spécifiques divergent selon les auteurs, que ce soit en termes de types de références recommandés ou de domaines d'application de ces références. Ceci est mis en lumière dans le Tableau 1 synthétisant les principales recommandations disponibles dans la littérature.

**Tableau 1 : Synthèse des principales recommandations existantes pour la définition de l'usage de référence pour la caractérisation des impacts associés à l'usage des sols**

| Approche adoptée | Recom-mandations UNEP-SETAC 2007                     | Recom-mandations UNEP-SETAC 2013 | Travaux de Cao et al. (2017)                              |                        |  | Travaux de Koponen et al. (2018) <sup>(1)</sup>   |
|------------------|--|----------------------------------|---|------------------------|--|---|
|                  |  |                                  | Perspective individualiste                                | Perspective égalitaire | Perspective hiérarchique                                 |   |
| Attributionnelle | VNP (après régénération naturelle)                   | VNP                              | Evaluation absolue :<br>« Référence = 0 »                 | VNP (état historique)  | Evaluation normative :<br>Niveau seuil                   | Evaluation absolue :<br>« Référence = 0 »   |
|                  |  |                                  | Etude d'une évolution en cours :<br>« Business as usual » |                        | Préférence au futur : VNP (après régénération naturelle) | Evaluation de la contribution aux impacts anthropiques globaux : VNP (après régénération naturelle) |
| Conséquentielle  | Usage alternatif (en l'absence du changement étudié) | Non traité                       | Usage alternatif (en l'absence du changement étudié)      |                        |  | Usage alternatif le plus probable   |

VNP : Végétation Naturelle Potentielle

<sup>(1)</sup> : Les auteurs de cette étude ont préféré formuler des recommandations différenciées selon la question posée, pour l'évaluation de systèmes de biomasse-énergie dans leur cas, plutôt que par catégories, telles qu'approches attributionnelle ou conséquentielle. Le lien fait ici entre ces travaux et ces deux approches constitue donc une interprétation par les auteurs de la présente étude.

En approche dite conséquentielle, les recommandations s'accordent entre elles et avec celles d'autres méthodologies telles les évaluations de projet carbone sur l'usage alternatif le plus probable. La référence doit alors être définie au cas par cas, selon le sujet traité et les conséquences étudiées. Par conséquent, cet aspect n'a pas été traité plus avant dans le cadre du projet.

En approche dite attributionnelle, différentes recommandations coexistent, le choix de l'état de référence le plus répandu étant celui de la Végétation Naturelle Potentielle, soit de façon générale pour toutes les études d'ACV de type attributionnel, soit pour certains types plus précis d'études. La définition même de la VNP peut différer selon les auteurs, notamment sur le caractère historique (état existant avant toute intervention humaine) ou futur (état potentiel après régénération) de la VNP, ces deux situations pouvant

être différentes, ce qui définit un impact irréversible et permanent de l'occupation des sols. En pratique toutefois, aucune des méthodes développées à l'heure actuelle ne prend en compte cet impact permanent, ce qui revient de fait à définir la VNP comme un état futur potentiel.

Compte tenu de ces divergences fortes dans les recommandations actuelles en termes de définition d'un état de référence pertinent en approche attributionnelle, cette question est traitée spécifiquement dans les cas d'étude.

### 2.1.3. Revue critique des méthodes disponibles

La revue bibliographique des méthodes de prise en compte de l'usage des sols et du carbone des sols en ACV a permis d'identifier près d'une trentaine de méthodes proposées dans la littérature, couvrant les 3 groupes suivants :

- Les méthodes liant les usages et changements d'usages, et changement climatique, qui constituent le cœur de l'étude ;
- Les méthodes liant flux de carbone biogénique et changement climatique; et
- Les méthodes relatives à la qualité des sols et impliquant le carbone du sol.

Parmi toutes ces méthodes, 21 ont été considérées comme d'un intérêt direct pour l'étude et ont été analysées en détails (*cf.* fiches techniques du Rapport bibliographique). Elles sont cartographiées, pour certaines regroupées par sous-groupes sous la dénomination « derivatives » du fait de ressemblances conceptuelles fortes Figure 3, selon leur intervention en phase d'inventaire et/ou de caractérisation d'impact et en lien avec l'usage des sols, la qualité des sols et/ou le changement climatique (Figure 3).

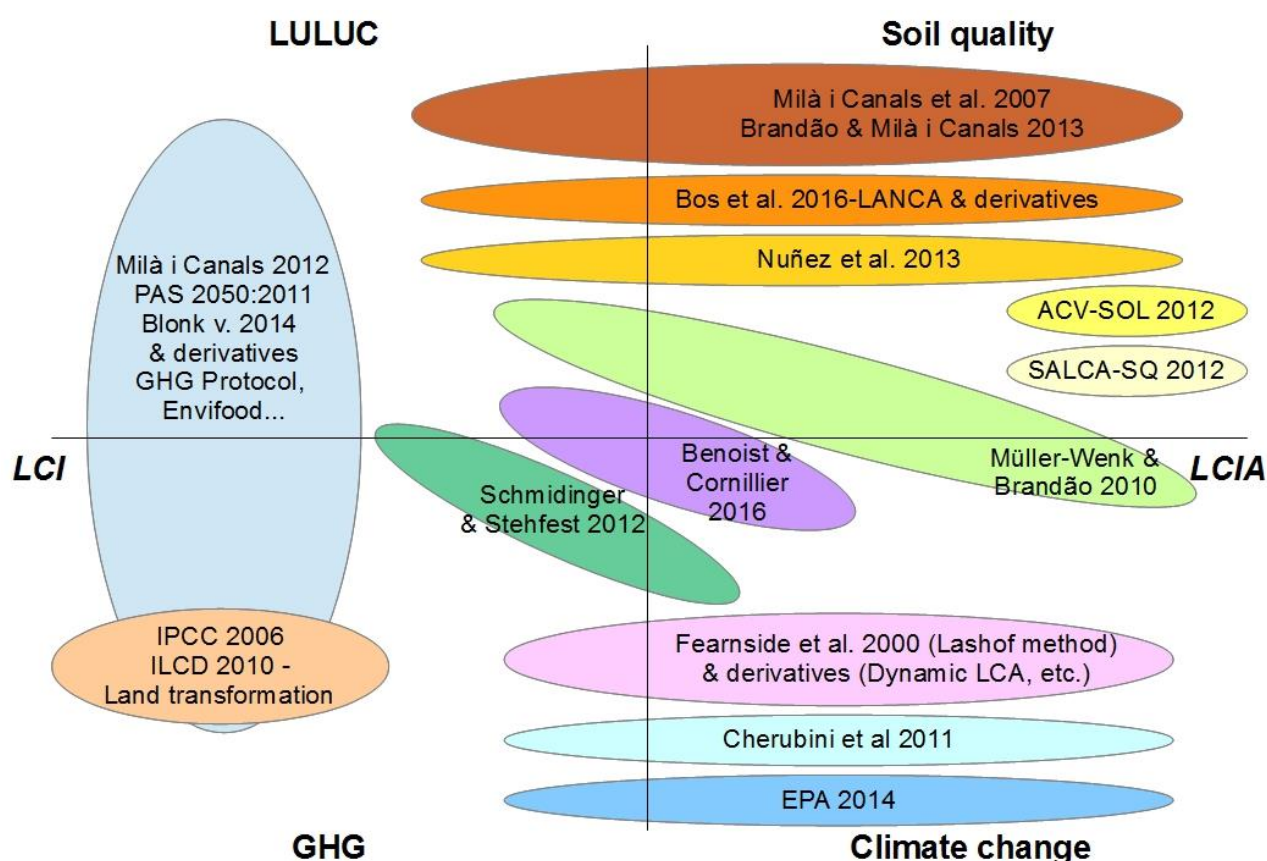


Figure 3 : Cartographie des méthodes relevant de l'inventaire de cycle de vie (LCI, à gauche) ou de l'évaluation des impacts de cycle de vie (LCIA, à droite), et traitant des usages et changements d'usages (LULUC, en haut à gauche), des émissions de gaz à effet de serre (GHG, en bas à gauche), de la qualité du sol (Soil quality, en haut à droite) ou du changement climatique (Climate change, en bas à droite)



L'urgence du changement climatique et l'importance du rôle du sol dans le stockage/déstockage de carbone et les émissions de gaz à effet de serre ont contribué au nombre important de propositions quant à la prise en compte du carbone des sols en ACV. Ces développements se sont accompagnés d'un foisonnement de questions et de propositions qui n'a pu donner lieu, jusqu'à présent, qu'à des consensus partiels, définis par défaut dans l'attente de développements plus intégrateurs et harmonisés.

Les méthodes traitant directement du lien entre usages et changements d'usages des sols et changement climatique sont particulièrement révélatrices de cette situation. Le praticien est confronté à des recommandations divergentes entre celles de l'IPCC d'une part, établies pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre mais très répandues dans la pratique de l'ACV et reprises dans les travaux de l'ILCD, et celles de l'UNEP-SETAC d'autre part, construites spécifiquement pour l'ACV. Au sein même des recommandations de l'ILCD coexistent ces divergences, l'approche de l'UNEP-SETAC étant reconnue pour les questions de qualité des sols, et celle de l'IPCC pour la quantification des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux changements d'usages des sols. Dès lors, les méthodes de l'IPCC/ILCD et de Müller-Wenk and Brandão (2010), qui est la déclinaison du cadre de l'UNEP-SETAC pour le changement climatique, nécessitent d'être comparées plus précisément.

Malheureusement, face au foisonnement constaté, les développements méthodologiques actuels restent généralement cloisonnés, conduisant à des traitements souvent différents des questions de stock de carbone du sol, de qualité du sol, et de cycle du carbone biogénique. De ce point de vue, malgré des bases parfois communes, du fait de l'existence du cadre conceptuel de l'UNEP-SETAC de prise en compte de l'usage des sols en ACV, les liens entre les méthodes relatives à la qualité des sols et celles spécifiques à l'impact des stockages / déstockages de carbone sur le changement climatique semblent le plus difficile à établir aujourd'hui sur le plan opérationnel. Seuls certains aspects plus ponctuels, tels que le lien entre les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote, déjà considéré dans les recommandations de l'IPCC, peuvent être appliqués à très court terme dans les études d'ACV. A l'inverse, d'autres aspects, tels que le lien entre érosion et stock de carbone du sol, semblent plutôt relever de perspectives de recherche en ACV.

Inversement, les méthodes relatives aux flux de carbone biogénique de façon générale d'une part, ou aux stocks de carbone des sols en particulier d'autre part, semblent plus propices à des rapprochements, avec des propositions allant d'ores et déjà dans ce sens. Notamment, le développement croissant de l'ACV dynamique, particulièrement marqué pour la catégorie d'impact du changement climatique, peut constituer un cadre intéressant pour une prise en compte homogène des différentes composantes du cycle du carbone biogénique, ce qui inclut les stocks de carbone du sol ou des couvertures du sol.

Néanmoins, les difficultés de prise en compte en ACV du lien entre usage des sols et changement climatique ne se résument pas à un choix entre différentes méthodes. En effet, au-delà de cet aspect, plusieurs autres questions sont prégnantes, telles que :

- La détermination effective des changements d'usages des sols ;
- L'existence et la disponibilité des données, tant pour caractériser les stocks de carbone que pour représenter les dynamiques d'évolution de ces stocks ;
- La notion de référence, qui est un choix clef pour la prise en compte d'impacts d'occupation et qui renvoie à des choix de valeurs ; ou
- L'allocation, ou répartition temporelle, des impacts des changements d'usages.

#### **2.1.4.Sélection des méthodes et des tests à réaliser sur les cas d'étude**

Sur la base de cette revue bibliographique, nous avons choisi de tester l'opérationnalité et la sensibilité des méthodes les plus abouties, robustes et prometteuses disponibles à ce jour pour faire le lien entre l'usage des sols, le stockage/déstockage de carbone des sols et l'impact changement climatique. Il s'agit des méthodes suivantes :

- le Tier 1 IPCC 2006, recommandé pour l'ACV par l'ILCD ;
- la méthode Müller-Wenk & Brandão 2010, recommandée par les travaux de l'UNEP-SETAC ; et

- l'ACV dynamique (Levasseur, 2011), encore en développement mais qui présente l'avantage d'être une réponse générique aux problématiques de prise en compte du cycle du carbone, dans lesquelles s'intègrent la prise en compte des impacts des usages et changements d'usages des sols sur les stocks de carbone.

Par ailleurs, à travers les cas d'étude, la sensibilité aux paramètres susmentionnés a été également testée : la détermination des changements d'usage, le choix des valeurs de stocks et des états de références, et les modes de répartition temporelle des impacts de transformation.

## 2.2. Résultats des cas d'étude

### 2.2.1. Présentation des cas d'étude

Cinq grands types de filières ont été retenus pour la diversité des situations et questions méthodologiques que celles-ci peuvent soulever, du fait de leur type de production, de leur cycle de production, ou de la disponibilité des données. Il s'agit des grandes cultures (maïs fourrage et blé tendre), de l'élevage (lait et viande), de la vigne, du soja et de la canne à sucre.

Les principaux critères considérés pour sélectionner ces filières sont les suivants :

- Prise en compte cultures annuelles, pluriannuelles, pérennes, et de produits animaux ;
- Prise en compte de la rotation (avec uniquement des cultures annuelles ou avec des cultures temporaires) ;
- Prise en compte de productions tempérées et tropicales ;
- Disponibilité de données d'inventaires de cycle de vie (ICV) ou de données permettant d'établir des ICV ;
- Possibilité d'étudier des scénarios contrastés (e.g. enherbement, fertilisation organique, gestion des résidus, travail du sol, gestion des prairies, etc.) afin d'évaluer la sensibilité des méthodes vis-à-vis des pratiques culturales ou de gestion des sols identifiées ; et
- Disponibilité suffisante de mesures expérimentales ou de données relatives aux stocks de carbone, afin de pouvoir évaluer la sensibilité des méthodes aux données utilisées et à leur nature (données expérimentales, données issues de modèles, données issues de la littérature).

### 2.2.2. Résultats des cas d'étude

Les résultats des cas d'étude obtenus avec les méthodes ILCD / IPCC et Müller-Wenk and Brandão (2010) sont présentés aux Figure 4 et Figure 5 pour, respectivement, les scénarios de changements d'usages des sols et de changements de pratiques.

#### Code pour la nomenclature des cas d'étude

- Le nom du produit en anglais (éventuellement abrégé)
- Entre crochets, un abrégé du type de climat IPCC :  
TrW pour Tropical Wet, TrM pour Tropical Moist, CTp pour Cold Temperate, WTp pour Warm Temperate ..
- Les abrégés du précédent et de l'actuel séparés par un tiret,  
\* Pour les usages :  
Fo pour forêt, Sa pour savane, Gr pour prairie permanente (grassland), Cr pour culture (cropland), Pe pour pérennes, Sc pour garrigue (scrubland) ...  
\* Pour les pratiques : Ti pour labour, NoTi pour non-labour, Burn pour résidus brûlés, Exp pour résidus exportés, NoExp pour résidus laissés au champ, BaS pour sol nu (bare soil), CoS pour sol enherbé ("covered" soil par analogie avec BaS) ...  
-> cas particuliers :  
\* pour les cas étudiés par Arvalis sans changement, seul un abrégé a été donné  
\* pour les changements de pratiques impliquant plusieurs paramètres, seul le plus "pertinent" a été conservé
- Entre parenthèses, le type de transformation : LUC ou LMC, voire NC pour les cas sans changement.

#### Exemples :

- pour le scénario soja avec déforestation, dans le Nord du Mato Grosso : Soy [TrW]: Fo-Cr (LUC)
- pour le scénario canne d'exportation des pailles, dans le Minas Gerais : SCane [TrM]: NoExp-Exp (LMC)

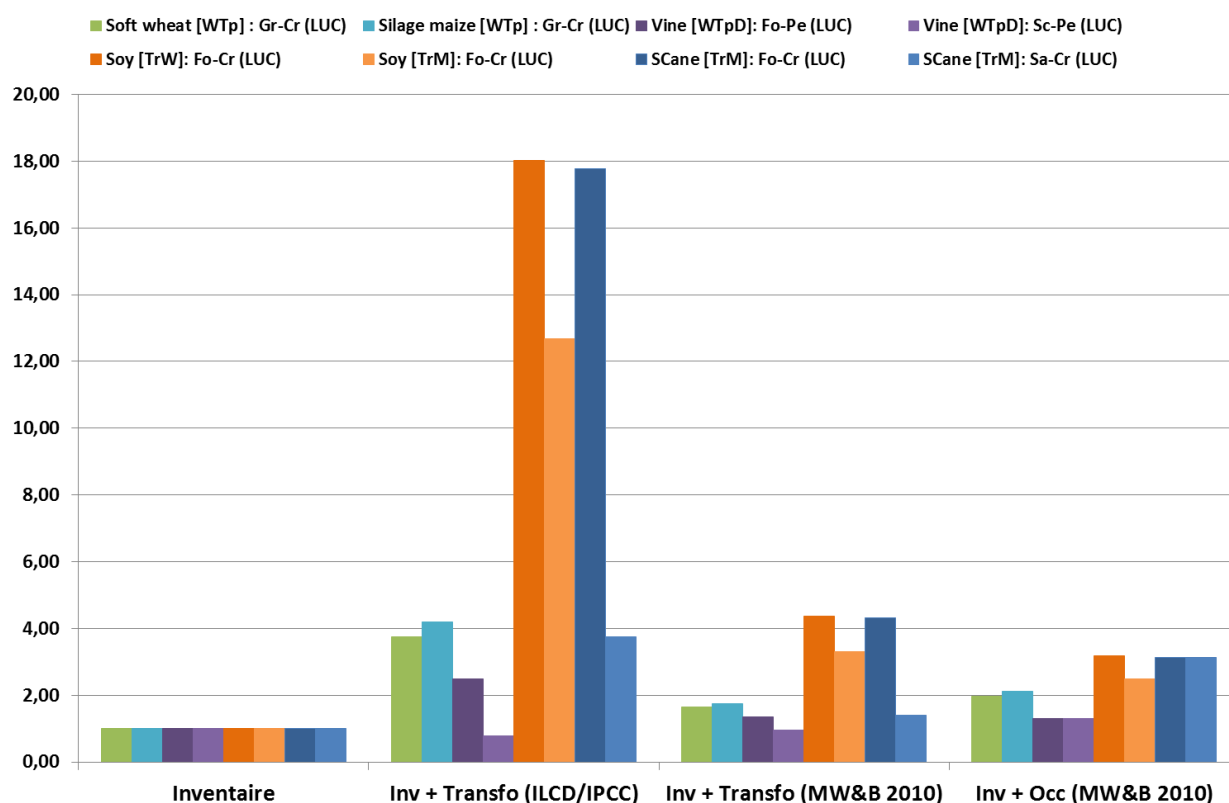


Figure 4 : Résultats des cas d'étude pour les scénarios de changements d'usages des sols, pour les méthodes ILCD / IPCC et Müller-Wenk and Brandão (2010)

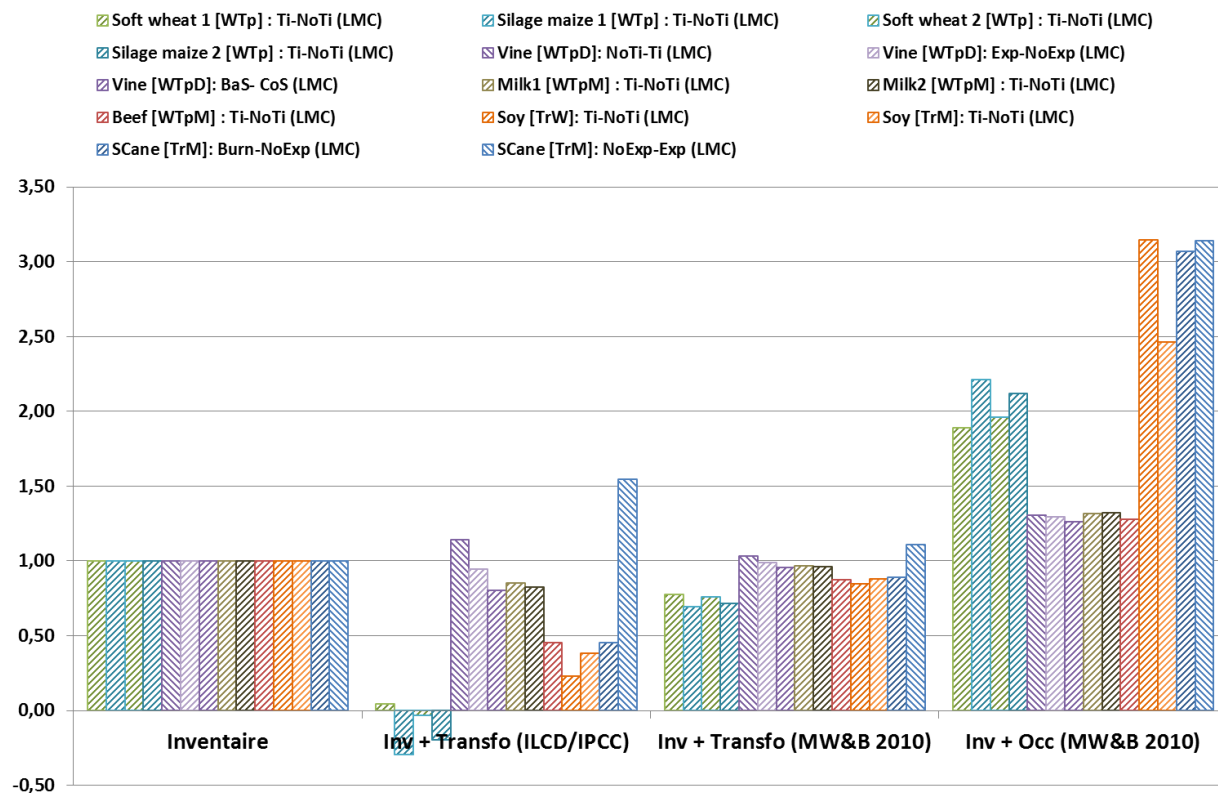


Figure 5 : Résultats des cas d'étude pour les scénarios de changements de pratiques, pour les méthodes ILCD / IPCC et Müller-Wenk and Brandão (2010)

Les résultats montrent l'importance que peuvent avoir les impacts de transformation pour les résultats d'ACV, en particulier avec la méthode IPCC / ILCD. En effet, avec cette méthode, les impacts de transformation peuvent représenter une augmentation jusqu'à un facteur 18 des impacts de l'inventaire dans le cas de changements d'usages (scénarios de déforestation sur canne ou soja au Brésil), ou une réduction de jusqu'à 130 % dans le cas de changements de pratiques (passage au non-labour sur maïs fourrage). Avec la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010), ces impacts ou bénéfices sont plus réduits que ceux obtenus avec la méthode ILCD / IPCC, d'un facteur variant généralement entre 3 et 6, mais restent significatifs par rapport à ceux de l'inventaire. Néanmoins, l'un des principaux aspects originaux de la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010) est d'introduire un impact d'occupation, qui s'applique à toutes les cultures, avec ou sans transformation. Pour les différents cas d'étude considérés dans le cadre du projet SOCLE, cet impact d'occupation représente une augmentation de 30 %, pour les filières vigne et élevage, à plus de 200 %, pour les filières tropicales soja et canne.

Toutefois, les deux méthodes ILCD / IPCC et Müller-Wenk and Brandão (2010) ont montré une grande sensibilité aux données de stocks de carbone, comme le montre la Figure 6 dans le cas des impacts de transformation calculés par la méthode ILCD / IPCC. Cette sensibilité est particulièrement marquée dans le cas des changements de pratiques, une variation de 10 % d'une valeur de stock pouvant se traduire par une variation du résultat d'impact de 700 %. Ceci s'explique par le fait que dans le cas de changements de pratiques, les différences de stocks mises en jeu sont faibles par rapport aux valeurs absolues des stocks, ce qui implique qu'une variation même faible de l'un de ces stocks peut avoir un effet très important sur la différence.

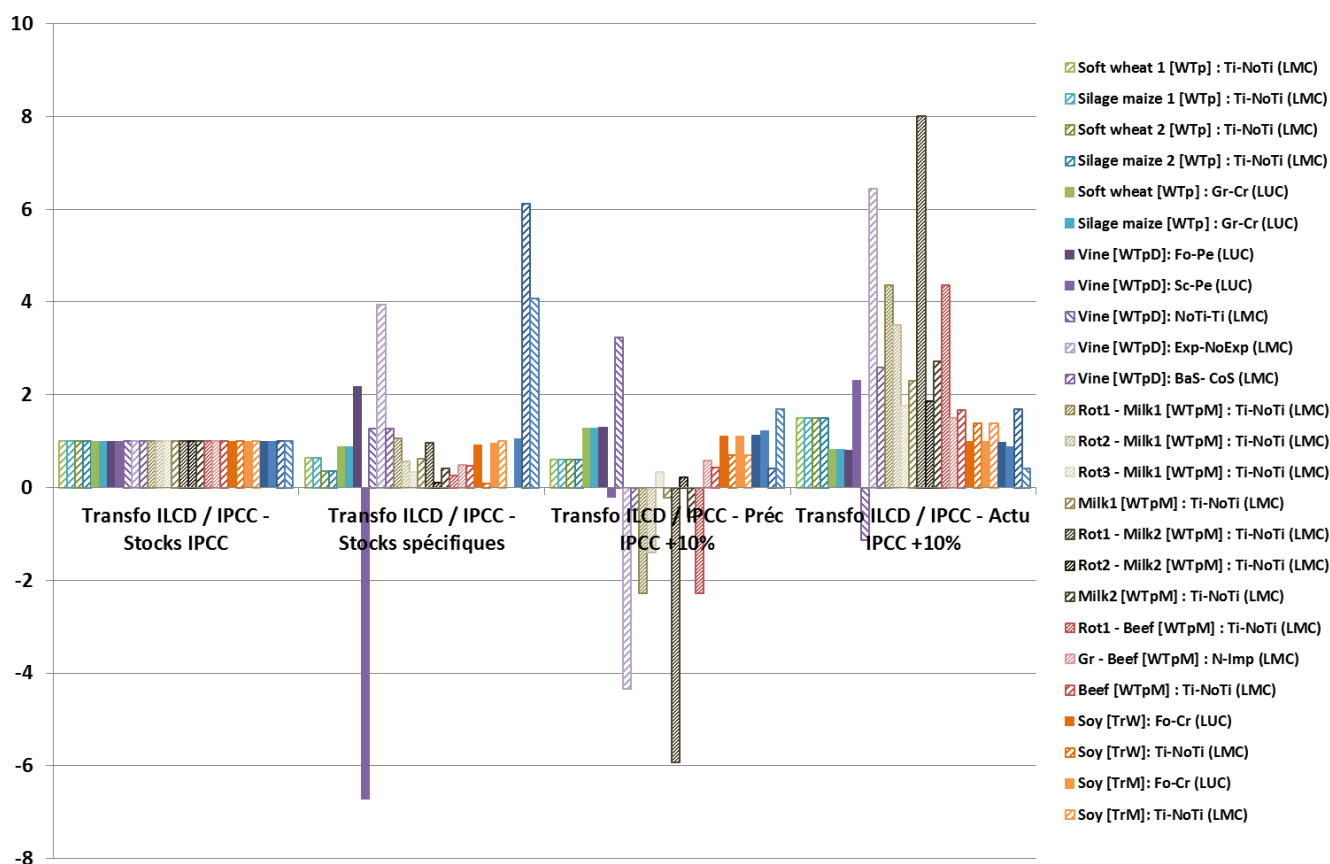
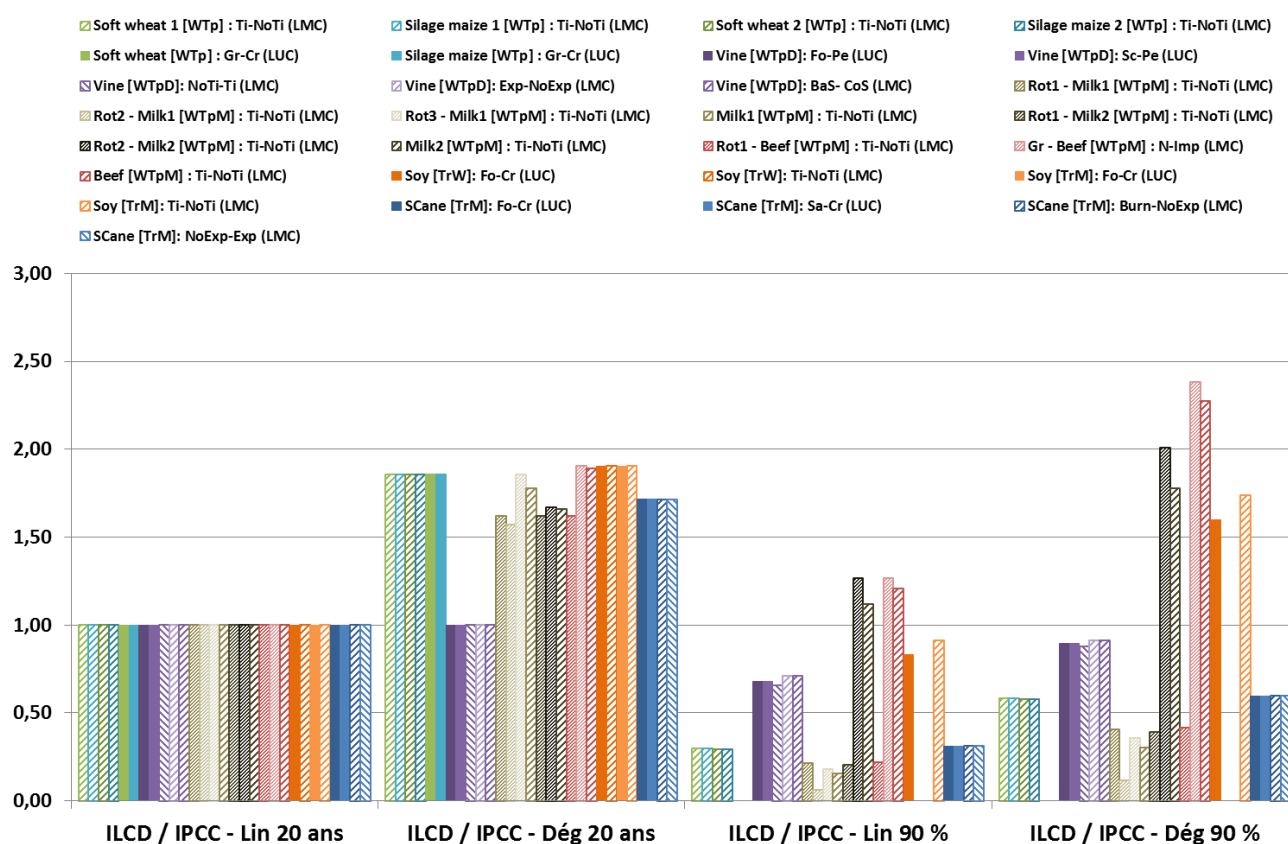


Figure 6 : Sensibilité des résultats des cas d'étude aux valeurs de stocks de carbone, cas de l'impact de transformation selon la méthode ILCD / IPCC (Référence = valeurs par défaut IPCC)

Dans le cas de la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010), plusieurs choix de référence ont été testés selon les cas d'étude : une VNP de type forêt ; une VNP de type garrigue ou savane arborée (cerradão) lorsque cela était pertinent ; un stock moyen sur la région d'étude, tous types d'usages confondus, selon la base RMQS ; un stock maximal sur la région d'étude, pour le type d'usage étudié, selon la base RMQS ; ou même un sol artificialisé, avec un stock de carbone considéré comme nul. Chacun de ces choix s'est révélé très influent sur les résultats d'impacts obtenus avec cette méthode, confirmant l'importance du choix et le besoin de mieux spécifier quel type de référence utiliser selon les objectifs et champ de l'étude.

De façon similaire, le mode de répartition temporelle des impacts de transformation s'est montré crucial pour le calcul de l'impact à attribuer à un produit, comme le montre la Figure 7 où plusieurs choix ont été testés : linéaire uniforme sur 20 ans (recommandation par défaut de l'IPCC), linéaire dégressif sur 20 ans (recommandation par défaut de l'ILCD), linéaire uniforme sur une période dépendant de la dynamique d'évolution des stocks, ou linéaire dégressif sur cette même période (recommandation avancée de l'ILCD). Ces recommandations, qui relèvent plus de choix de valeurs que de justifications scientifiques, devraient donc être harmonisés pour une meilleure pratique ACV.



**Figure 7 : Sensibilité des résultats des cas d'étude au mode de répartition temporelle des impacts de transformation, cas de l'impact de transformation selon la méthode ILCD/IPCC (Référence = répartition linéaire uniforme sur 20 ans)**

Enfin, les recommandations quant aux liens entre cycles du carbone et de l'azote, existantes dans les lignes directrices de l'IPCC (2006), ont également été testées. L'application de ces recommandations peut conduire à une augmentation des impacts de transformation calculées selon la méthode ILCD / IPCC jusqu'à 14 % dans le cas de l'utilisation des valeurs par défaut proposées par l'IPCC, ou jusqu'à 13 % dans le cas de l'utilisation de données spécifiques pour le rapport C:N du sol. L'intégration du lien entre carbone et azote, qui est parfaitement opérationnelle grâce aux recommandations de l'IPCC mais pourtant peu utilisée en pratique, mériterait donc d'être plus couramment employée compte tenu de son impact sur les résultats.



### 3. Conclusions et recommandations

La revue critique de la bibliographie et la mise en situation des méthodes retenues dans le cadre de filières contrastées ont permis de mettre en exergue les intérêts et limites concrètes des applications à ce jour des méthodes de prise en compte du carbone du sol dans les ACV pour caractériser les impacts des usages et changements d'usage des sols. Sur cette base, les recommandations issues du projet SOCLE se déclinent selon deux niveaux de technicité qui ne présagent pas de la finalité de l'ACV réalisée : le Niveau 1) regroupe les recommandations minimales à appliquer ; et le Niveau 2) désigne les usages plus avancés de la méthodologie ACV :

- Pour définir **l'occurrence des changements d'usage**, *i.e.*, depuis quels types d'usage et en quelles proportions, il est recommandé :
  - **Niveau 1** : d'appliquer une approche nationale, voire internationale selon les limites du système, basée sur des statistiques globales : *e.g.* modèle normatif de type Blonk. Tant que les données le permettent, une moyenne pondérée des précédents est à privilégier (*e.g.* approche de l'ENVIFOOD Protocol). Il est essentiel de s'assurer, dans l'application de cette approche, d'une cohérence temporelle entre l'analyse rétrospective des changements d'usage et la répartition temporelle prospective des impacts ; par défaut cette durée est de 20 ans ;
  - **Niveau 2** : d'appliquer ou de développer un modèle spécifique au cas d'étude de type « Causal Descriptive Model <sup>6</sup> » ou d'utiliser un modèle d'équilibre économique en particulier dans le cas d'une ACV conséquentielle. Dans ce cadre, il est également essentiel de veiller à la pertinence et la cohérence des échelles temporelles utilisées.
- Pour calculer **les variations de stock de carbone** liées à des changements d'usages ou de pratiques, il est recommandé :
  - **Niveau 1, en l'absence de données spécifiques** : d'appliquer l'approche IPCC 2006 Tier 1. Pour un même usage, les facteurs de pondération en lien avec le travail du sol et les intrants permettent de considérer quelques changements de pratiques affectant les stocks de carbone. Il est conseillé de faire une analyse de sensibilité sur les stocks de carbone considérés notamment lorsque le choix des facteurs de pondération est incertain ou éloigné des conditions du cas d'étude ;
  - **Niveau 1, lorsque des données spécifiques sont disponibles, et Niveau 2** : d'appliquer l'approche IPCC 2006 Tier 2 sur la base de données de terrain ou de modélisation. Il est important d'être vigilant sur la cohérence du jeu de données spécifiques utilisées par rapport à l'ensemble des calculs : *e.g.* cohérence temporelle pour les atteintes d'équilibre, cohérence avec les états de références ou les usages comparés en termes de stocks de carbone considérés, de profondeur du sol considérée, etc.
- Pour calculer **l'impact changement climatique** lié aux usages des sols et aux changements d'usages ou de pratiques, il est recommandé :
  - **Niveau 1** : de choisir une des deux méthodes recommandées à l'heure actuelle par les instances internationales, *i.e.* la méthode ILCD / IPCC ou la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010) (UNEP-SETAC). Ce choix doit se faire en accord avec les objectifs et le champ de l'étude. Il est recommandé de considérer les principaux avantages et inconvénients des deux méthodes, synthétisés dans le Tableau 2, afin de mettre en œuvre et de justifier ce choix. Des tests de sensibilité sur les principaux paramètres (données de stock, état de référence, etc.) sont conseillés pour éclairer la pertinence et le domaine de validité des résultats.

<sup>6</sup> Les « causal descriptive models » permettent d'établir des relations de cause à effet entre des changements dans les systèmes de production et de consommation et les changements d'usage. Ils prennent en compte l'influence des marchés, mais de manière simplifiée par rapport aux modèles d'équilibre économique, et les données statistiques d'usage des sols et de productions pour construire les scénarios prospectives. Ils requièrent l'intervention d'expert pour construire ces scénarios et définir les relations de cause à effet susceptibles d'intervenir dans ces scénarios (*cf. Rapport de revue bibliographique SOCLE : Benoist & Bessou, 2018*).

**Tableau 2 : Avantages comparés des méthodes IPCC / ILCD et Müller-Wenk and Brandão (2010)**

|  | <b>Méthode ILCD / IPCC</b>   | <b>Méthode Müller-Wenk &amp; Brandão (2010)</b>  |
|--|--|--|
| <b>Reconnaissance scientifique</b>                                 | Méthode la plus couramment recommandée dans la littérature.  | Méthode reconnue d'un point de vue scientifique mais peu recommandée en dehors de l'UNEP-SETAC et d'usage peu répandu.   |
| <b>Caractère opérationnel (utilisation des valeurs par défaut)</b> | Méthode simple et globale, lorsque les valeurs par défaut de l'IPCC Tier 1 sont utilisées.   | Méthode simple et globale, lorsque les facteurs de caractérisation et autres paramètres par défaut, tels que les temps de régénération, sont utilisés.   |
| <b>Caractère opérationnel (adaptation au contexte local)</b>       | Méthode facilement modifiable pour tenir compte de données spécifiques de stocks.  | Méthode facilement modifiable pour tenir compte de données spécifiques de stocks, mais limitée par l'accessibilité des données pour définir des temps de régénération spécifiques.   |
| <b>Pertinence scientifique de la caractérisation des impacts</b>   | <p>Méthode permettant de ne prendre en compte que les transformations d'usages des sols et de pratiques.</p> <p>Méthode traitant sur un pied d'égalité stockages et déstockages de carbone biogéniques d'une part, et émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile d'autre part, négligeant notamment la réversibilité et la dynamique des stockages/déstockages.</p>   | <p>Méthode permettant de prendre en compte à la fois les transformations d'usages des sols et les occupations.</p> <p>Méthode intégrant partiellement des informations concernant la dynamique des émissions, ce qui la rend plus complète en termes d'évaluation des impacts, mais également tributaire d'un plus grand nombre de paramètres spécifiques, e.g., les temps de régénération, qu'il est difficile de calibrer.</p> |
| <b>Interprétation des résultats</b>                                | Les impacts calculés ne dépendent que du précédent immédiat.   | La signification des impacts calculés dépend de l'état de référence choisi. Son choix est primordial pour permettre la comparaison de situations ce qui est souvent le cas en ACV attributionnelle.  |
| <b>Conseils d'utilisation</b>                                      | Il est important de signaler que selon les référentiels, l'impact sur le changement climatique peut agréger la contribution des changements d'usages ou de pratiques à celle des autres émissions de gaz à effet de serre de l'inventaire, tel que recommandé par l'ILCD par exemple, ou être décomposé en deux indicateurs distincts présentant séparément ces deux contributions, tel que recommandé dans la norme ISO 14067 sur l'empreinte carbone par exemple. Le praticien doit alors bien spécifier dans quel référentiel l'ACV réalisée s'inscrit. | Dans un premier temps, il est recommandé de ne pas agréger les impacts d'occupation avec les autres sources d'impact sur le changement climatique.   |

- **Niveau 2** : d'appliquer la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010) pour être cohérent avec le cadre conceptuel « land use » qui est également utilisé pour d'autres catégories d'impact (*i.e.* impacts sur la qualité des sols et la biodiversité) et contribuer à l'amélioration de l'approche. Il est conseillé, dans la mesure du possible, d'utiliser des données de stocks de carbone soit selon l'approche IPCC 2006 Tier 2, soit basées sur des mesures de terrain ou de modélisation. Il est recommandé de définir un état de référence qui soit en adéquation avec les objectifs et champs de l'étude ACV menée et d'être transparent sur le choix de cet état de référence et son influence sur les résultats. Dans la mesure du possible, il est également conseillé d'utiliser des données de terrain ou de modélisation pour caractériser les stocks de l'état de référence utilisé et quantifier les dynamiques de régénération. Dans tous les cas, il est conseillé de faire une analyse de sensibilité avec d'autres états de référence potentielle et/ou d'autres dynamiques de régénération ;
- **Niveau 1 & 2** : de considérer en plus, au niveau de l'inventaire, les pertes d'azote liées à la minéralisation de l'azote du sol dans le cas d'une perte de carbone du sol lié à un changement d'usages ou de pratiques selon l'approche IPCC 2006 Tier 1 ou Tier 2. Dans le cadre du Tier 2, il est conseillé, dans la mesure du possible, de considérer un ratio C/N issu de données de terrain ou de la littérature plutôt que le ratio par défaut IPCC.
- Pour effectuer **la répartition temporelle de l'impact de transformation**, quelle que soit la méthode appliquée pour calculer la variation de stocks et quel que soit l'indicateur final étudié (changement climatique ou qualité du sol), il est recommandé :
  - **Niveau 1** : d'allouer les impacts selon un mode dégressif sur 20 ans, en accord avec les recommandations actuelles de l'ILCD. Ce mode d'allocation, tout aussi subjectif mais valide que l'allocation linéaire uniforme de l'IPCC, permet de mieux prendre en compte l'urgence climatique. D'autre part, il permet de réduire le risque d'impact tronqué dans le cas où rétrospectivement des systèmes de production de moins de 20 ans sont considérés sans que leur impact initial de transformation soit connu ;
  - **Niveau 2** : d'allouer les impacts selon un mode dégressif sur le temps nécessaire à l'atteinte de 90% du changement de stock sur la base de données de terrain ou de modélisation. Cette allocation permet de mieux prendre en compte la dynamique naturelle des processus de stockage/déstockage de carbone. Ces résultats devraient être comparés dans le cadre d'une analyse de sensibilité avec d'autres modes de répartition temporelle.

Le projet SOCLE a permis de faire un état des lieux des méthodes existantes d'un point de vue à la fois conceptuel et opérationnel. Il a mis en exergue le manque crucial de données de terrain ou de modélisation fiables pour permettre de caractériser finement les changements de stock de carbone liés aux changements d'usage et de pratiques. Pour aller au-delà des facteurs de l'IPCC et couvrir plus largement l'ensemble des différentes pratiques des divers systèmes de production, des travaux de recherche sont nécessaires pour établir de nouvelles bases de données plus diversifiées et sensibles aux pratiques et aux contextes pédoclimatiques déclinés à des échelles plus fines.

Concernant les bases de données qui permettent de mettre en œuvre les méthodes existantes, le RMQS et l'HWSD constituent des sources de données d'intérêt. Cependant, le RMQS demeure lié aux délimitations administratives (régions) et aux couvertures de sol récentes (2013). D'une part le maillage géographique peut être peu adapté à l'évaluation d'une situation à une échelle infrarégionale. D'autre part, dans le cas d'une zone d'évolution rapide des usages des terres, les valeurs des stocks de carbone ne correspondent pas nécessairement aux valeurs d'équilibre sous l'usage étudié. Les valeurs de stock de carbone seraient plus représentatives des situations étudiées si des bases de données étaient développées sur les résultantes en termes de stocks de carbone des couples (propriétés intrinsèques des sols, usages des sols et pratiques). Ce genre de travaux a été à l'origine de la déclinaison des facteurs de pondération IPCC et pourrait être modélisés de manière plus fine.

Dans le cas des systèmes de pérennes, des valeurs de stocks de carbone dans la biomasse peuvent avoir un impact non négligeable sur le bilan final. Il serait nécessaire de développer des bases de données permettant de mieux quantifier ces biomasses en fonction des usages et des pratiques. Pour les différents types d'usage, une déclinaison plus fine serait également nécessaire pour estimer les quantités de biomasse résiduelle éventuellement valorisable sous forme de co-produits. L'attention accordée à la quantification des stocks de biomasse et des stocks de carbone dans le sol doit être cohérente.

Des travaux de recherche sont également nécessaires pour approfondir plus spécifiquement les valeurs de stocks utilisées pour caractériser certains usages particuliers (prairies temporaires, prairies permanentes, cultures pérennes) et les états de référence, naturels ou non, et les temps de régénération.

Le projet SOCLE a été l'occasion de mobiliser dans des tests exploratoires différentes sources de données, qui se sont avérées intéressantes :

- Mobilisation de données du RMQS, extraites spécifiquement pour les besoins de SOCLE, afin d'estimer des stocks de carbone pour des références régionales pour des cas d'étude métropolitains. Deux options ont été testées : l'utilisation en tant qu'état de référence, une valeur de stock de carbone maximale pour l'usage étudié et une valeur régionale médiane tout usage confondu. La comparaison des stocks de carbone des cas d'étude avec ces références régionales apporte un éclairage intéressant dans des travaux ACV. La mise à disposition d'extraction RMQS pour ces besoins est à étudier (conditions d'accès, clé d'interprétation des données statistiques, extraction fonction de la région mais également du type de sol ?).
- Mobilisation des estimations par le CITEPA de changements d'usage en France métropolitaine sur la base de Corine Land Cover et de statistiques régionales, en cours de validation. Celle-ci s'appuie sur des données plus fines que celles mobilisées par Blonk Consultants, 2013 et constitue par conséquent une source de données intéressantes. Cependant, son utilisation sur le cas d'étude vigne s'est avérée peu pertinente du fait que la vigne est rattachée à la catégorie cultures annuelles (conformément aux catégories d'usage définies par l'IPCC pour les inventaires). La définition de catégories plus fines serait nécessaire pour une mise en œuvre pour des ACV à l'échelle de produit. D'autre part, il s'agit d'estimations provisoires, qui doivent encore être confrontées à d'autres sources de données.

Concernant le choix de la méthode de calcul des impacts sur le changement climatique liés aux usages des sols et aux changements d'usages ou de pratiques, le projet SOCLE a permis de mieux comprendre les avantages et inconvénients respectifs des méthodes disponibles. Le projet a également permis de souligner que ce choix de méthode doit être conforme aux objectifs et champ de l'étude, et doit donc être réalisé d'un commun accord entre le praticien ACV, qui produit les résultats, et le commanditaire de l'étude d'ACV, qui les utilise. Afin d'être plus précis dans les recommandations du projet, il est donc nécessaire d'impliquer ces deux types d'acteurs au cours de différents tests ayant lieu dans différents contextes d'application de l'ACV.

## 4. Références

- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (Eds) (2002) Mitigation of the greenhouse effect Increasing carbon stocks in French agricultural soils? Scientific Assessment Unit for Expertise. Synthesis of an Assessment Report by the French Institute for Agriculture Research (INRA) on request of the French Ministry for Ecology and Sustainable Development. October 2002, 33 p.
- Baumert K.A., Herzog T., Pershing J. (2005) Navigating the Numbers; Greenhouse Gas Data and International Climate Policy. © World Resources Institute, ISBN: 1-56973-599-9, USA. 2005, 132 p.
- Cao V, Margni M, Favis BD, Deschênes L (2017) Choice of land reference situation in life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess* 22:1220–1231. doi: 10.1007/s11367-016-1242-2
- Cowell S, Clift R (1997) Impact assessment for LCAs involving agricultural production. *Int J Life Cycle Assess* 2:99–103. doi: 10.1007/BF02978767
- Germon J.C., Cellier P., Gabrielle B., Hénault C., Laville P. (2009) Sol et changement climatique *In*. INRA janvier 2009. Dossier Le Sol.
- Kløverpris J, Wenzel H, Nielsen PH (2008) Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption. *Int J Life Cycle Assess* 13:13–21. doi: 10.1065/lca2007.10.364
- Koellner T, de Baan L, Beck T, et al (2013) UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *Int J Life Cycle Assess* 18:1188–1202. doi: 10.1007/s11367-013-0579-z
- Koponen K, Soimakallio S, Kline KL, et al (2018) Quantifying the climate effects of bioenergy – Choice of reference system. *Renew Sustain Energy Rev* 81:2271–2280. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.292
- Lal R. (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*. 304, 1623-1627.
- Levasseur, Annie, 2011. Développement d'une méthode d'Analyse du Cycle de Vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique. S.l. : Université de Montréal.
- Lindeijer E (2000) Review of land use impact methodologies. *J Clean Prod* 8:273–281. doi: 10.1016/S0959-6526(00)00024-X
- Milà I Canals, Llorenç, Bauer, Christian, Depestele, Jochen, Dubreuil, Alain, Freiermuth Knuchel, Ruth, Gaillard, Gérard, Michelsen, Ottar, Müller-Wenk, Ruedi Et Rydgren, Bernt, (2007) Key elements in a framework for Land Use Impact Assessment within LCA. *Int J Life Cycle Assess* 12:5–15.
- Müller-Wenk R, Brandão M (2010) Climatic impact of land use in LCA—carbon transfers between vegetation/soil and air. *Int J Life Cycle Assess* 15:172–182. doi: 10.1007/s11367-009-0144-y
- Reap J., Roman F., Duncan S., Bras B. (2008) A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 2: impact assessment and interpretation. *Int. J. LCA*. 13, 374-388.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O. (2007) Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK.



## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)